

基于有限元分析方法的聚氨酯磨损规律研究

黄乐^{1,2}, 贾晓红², 郭飞², 索双富², 周春华³

(1. 广州机械科学研究院有限公司, 广东 广州 510700; 2. 清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084; 3. 宁波中意液压马达有限公司, 浙江 宁波 315200)

摘要:采用环块磨损试验机进行滴油润滑条件下聚氨酯材料的摩擦磨损试验, 研究聚氨酯材料在不同压力、转速、磨损时间下的磨损情况。采用表面形貌测量仪测量磨损试样的磨痕深度, 通过有限元分析软件Ansys计算不同试验压力下对磨面的接触压力, 根据Rhee的磨损经验公式, 通过对试验数据非线性回归拟合获得聚氨酯材料的磨损经验公式, 拟合结果与实测结果吻合良好。

关键词:聚氨酯; 环块磨损; 有限元分析; 磨损经验公式

中图分类号: TQ330.7⁺5; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2016)07-0398-05

橡塑密封件是依靠过盈产生的接触压力来实现密封, 而过盈的存在会导致密封件在动密封中产生磨损, 磨损是决定橡塑密封件使用寿命和导致失效的关键因素之一。气动密封件与液压密封件相比, 其工作介质是空气, 几乎没有润滑性, 只是采用涂以润滑油或润滑脂的方式进行润滑, 使用条件比较恶劣^[1]。聚氨酯材料以良好的机械性能、耐磨和耐油性能, 成为液压传动与控制系统重要的密封件材料^[2]。

为了获得聚氨酯材料的摩擦磨损特性, 人们开展了一系列试验研究^[3-6], 但大部分的研究都是对聚氨酯摩擦特性的定性分析, 未能给出材料摩擦磨损特性与影响参数, 如接触压力、速度及对磨时间等的定量关系。

本研究采用环块磨损试验机开展滴油润滑状态下聚氨酯材料的磨损试验, 通过有限元分析方法获得试样在试验时的接触压力, 通过表面形貌测量方法获得试样的磨痕深度, 最后基于Rhee的磨损经验公式拟合得到聚氨酯材料的磨损经验公式, 为聚氨酯材料密封件的设计和磨损寿命预测提供参考。

基金项目: 国家科技重大专项项目(2013ZX04010021); 工业摩擦学重点实验室技术研究计划项目(19300013)

作者简介: 黄乐(1986—), 男, 广东河源人, 广州机械科学研究院有限公司工程师, 清华大学在读硕士研究生, 主要从事橡塑密封产品数值仿真及试验研究。

1 实验

1.1 试验设备

聚氨酯摩擦磨损试验在MR-5H型高速环块摩擦磨损试验机上进行, 试验原理如图1所示。试验条件为滴油润滑, 所用的润滑油为32[#]液压油。试样材料为往复密封中常用的聚氨酯材料, 对磨环的材料为活塞杆常用材料GCr15。T. Papatheodorou等^[7]研究认为活塞杆或缸筒粗糙度的经验区间为0.2~0.6 μm, 为此将对磨环的表面粗糙度打磨至0.4 μm。

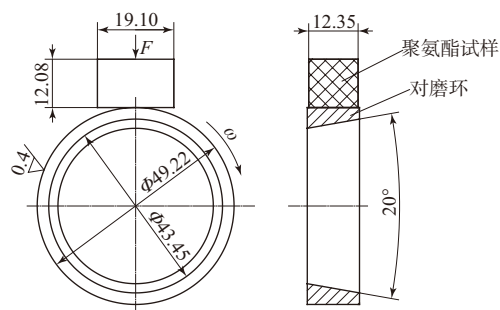


图1 环块磨损试验原理示意

1.2 试验方法

采用滴油润滑的方式开展聚氨酯磨损试验研究, 发现滴油量对摩擦因数有较大影响。为了降低滴油量差异对试验结果的影响, 根据设备测量的摩擦因数来控制滴油量, 使所有试验的摩擦因数控制为约0.07。由于磨损量随着压力、速度以及磨损时间等参数的改变而变化, 因此分别研

究了以上参数单独变化时聚氨酯材料的磨损情况。试验压力选择100, 125和150 N; 试验时间选择0.5, 1.0和1.5 h; 试验转速选择800, 1 000和1 200 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 转化成相应的线速度为2.06, 2.58和3.09 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 数据测量

对磨的速度以及时间可以在试验过程中直接读取, 而对磨面的接触压力和试样的磨损量则需要进行相应数据处理。

2.1 接触压力计算

为了研究聚氨酯材料磨损量与接触载荷的关系, 需要获得摩擦副上聚氨酯试样的接触压力。由于实际接触压力不易测量, 通常采用估算法来计算试验接触压力, 即将平均接触压力(试验压力除以磨痕宽度)等效为实际接触压力, 由于摩擦副为环块副, 因此聚氨酯试样与对磨环之间的接触压力分布是不均匀的。

为获得更为准确的接触压力数值, 通过有限元分析软件Ansys建立环块试验3D对称有限元分析模型, 模拟不同试验压力下试样的受力情况, 获得试样的接触压力分布, 并选择对磨环顶部的最大接触压力作为试验分析数值。

由于模型具有对称性, 为了简化分析模型以节省计算机资源, 同时也便于约束的施加(即通过对称约束来实现分析对象轴向和切向约束, 从而避免刚体位移的出现), 建立双面对称的有限元分析模型。由于试验时对磨环安装在实心轴上, 因此将其建成实心模型, 建立的有限元分析模型与实际模型的对比如图2所示, 图中的深色区域为建立的有限元分析模型。

定义对磨环的弹性模量为 2.1×10^5 MPa, 泊松比为0.3, 通过三参数的Mooney-Rivlin模型^[8]定义聚氨酯材料, Mooney-Rivlin模型的3个参数由聚氨酯材料单轴压缩和拉伸试验数据拟合得到^[9-10], 参数的具体取值为: $C_{10}=0.88$, $C_{01}=2.27$, $C_{11}=4.01$ 。采用Solid 185单元和六面体网格对实体模型进行网格划分, 网格划分结果如图3(a)所示。边界约束如图3(b)所示, 对两个对称面施加对称约束, 在对磨环的底部施加零位移约束, 在聚氨酯试样顶部施加均布压力约束, 如图3(b)中的

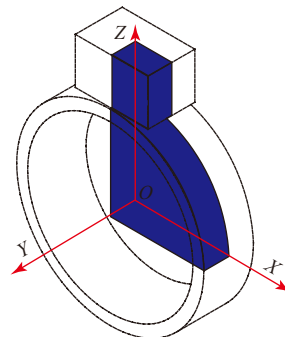


图2 试验摩擦副与有限元分析模型对比

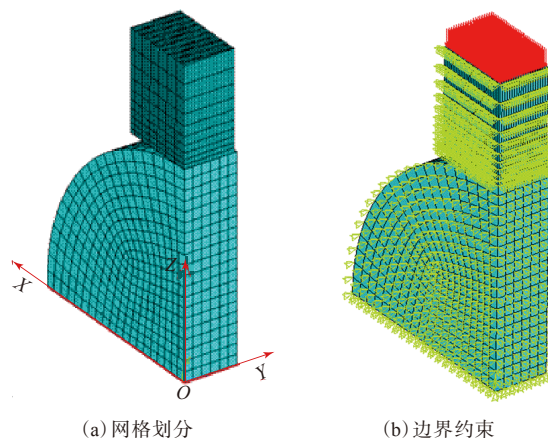


图3 网格划分及边界约束

红色区域所示, 均布压力等于试验压力除以试样顶部面积。

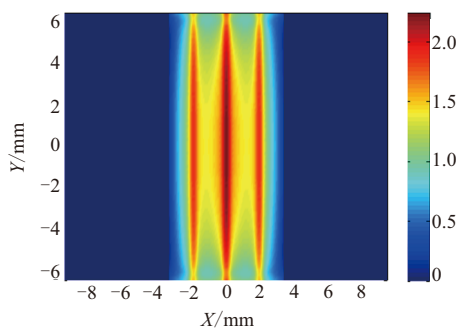
磨损前不同试验压力下聚氨酯试样接触压力的分析结果如图4所示。

从图4可以看出, 聚氨酯试样与对磨环在接触区的接触压力不是均匀分布的, 在对磨环的顶部接触压力最大。例如, 试验压力为125 N时, 有限元分析得到最大接触压力为2.446 MPa, 而通过估算法计算的压力为1.45 MPa。

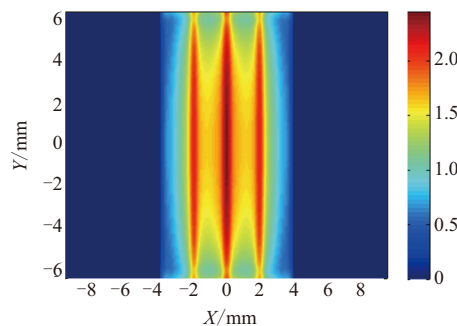
随着材料的磨损, 试样的轮廓会发生变化, 因此建立磨损后的试样模型, 通过有限元分析软件计算聚氨酯试样发生磨损后与对磨环的接触压力分布, 确定磨损对接触压力的影响。

磨损前后试样模型如图5所示, 磨损区域的尺寸通过表面形貌测量仪获得的试样磨损后轮廓确定。在压力为125 N、转速为1 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件下磨损1 h后的聚氨酯试样与对磨环的接触压力有限元分析结果如图6所示。

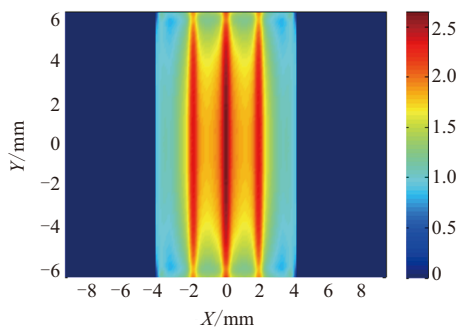
对比图4(b)与6可以看出, 磨损后的接触宽度



(a) 压力100 N

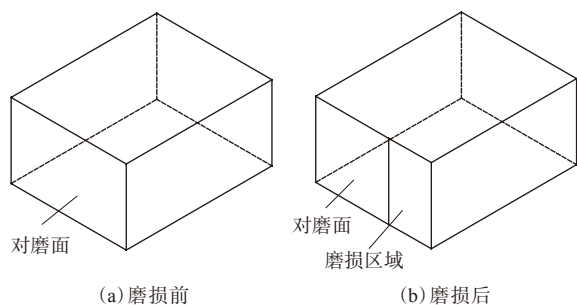


(b) 压力125 N



(c) 压力150 N

图4 磨损前聚氨酯试样接触压力分布



(a) 磨损前

(b) 磨损后

图5 试样磨损前后的分析模型

变大,最大接触压力减小,接触压力分布也略有改变,但最大接触压力还是处于与环块顶部接触的区域,因此选择此处接触压力作为分析用接触压

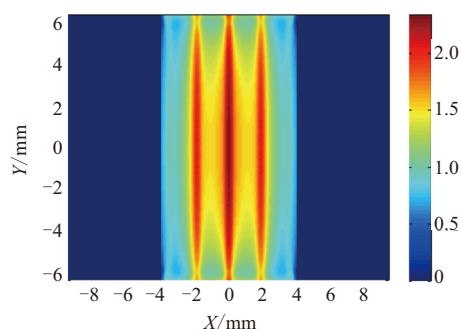


图6 磨损后聚氨酯试样接触压力分布(压力125 N)

力,这也便于磨痕深度的测量,即磨痕深度的最大值则为此处的磨损量。由于短时间磨损后试样的最大接触压力略有减小,例如,125 N试验压力下的试样磨损前后的最大接触压力从初始的2.446 MPa减小到2.338 MPa,因此选择磨损前后的最大接触压力的平均值作为磨损分析压力。通过有限元分析计算获得的各试样磨损前后最大接触压力的平均值如表1所示。

表1 试样磨损前后的最大接触压力 MPa

项 目	试验压力/N		
	100	125	150
磨损前	2.235	2.446	2.644
磨损后	2.132	2.338	2.536
平均值	2.184	2.392	2.590

2.2 磨损测量

聚氨酯的磨损率非常低,比一般橡胶材料(如天然橡胶、丁腈橡胶等)的磨损率要低2个数量级^[4],并且由于试验是在滴油润滑条件下进行的,材料可能会吸收一部分润滑油,使磨损量无法准确测量。对于磨损量小且试样密度较小的环块磨损试验,试验后磨损量不易称量,常采用下式计算其磨损体积(V)^[11]:

$$V = L(R^2 \arcsin \frac{a}{2R} - \frac{a}{2} \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}}) \quad (1)$$

式中, L 为试样宽度, R 为试样外半径, a 为磨痕宽度。

该式适用于材质较硬的材料,但由于聚氨酯材料相对较软,在较大试验压力下试样会发生较大变形,从而使磨痕宽度增大,导致计算的材料磨损量比实际值大。因此采用表面形貌测量仪测量磨痕深度,测量仪的最小垂直分辨率为0.8 μm 。同时为了消除压缩变形对试样的影响,将磨损后

的聚氨酯试样从环块磨损试验机中取下放置24 h后再进行测量。

在压力为125 N、转速为1 000 r·min⁻¹条件下磨损0.5 h后聚氨酯试样的磨损测量结果如图7所示。

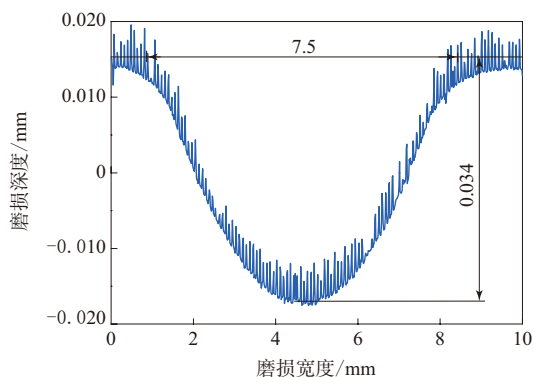


图7 磨损测量结果

由图7可以看出,试样磨痕宽度约为7.5 mm,磨痕深度为0.034 mm,该磨损量如果转化为磨损质量约为2.5 mg(聚氨酯密度1.2 Mg·m⁻³)。可见如果采用称量法,天平的精度至少要到达1 mg,且要将试样表面的润滑油清除干净,并且要求材料不会吸收润滑油。而采用式(1)计算获得的磨损体积为14.43 mm³,转化成磨损质量为17.2 mg,与实际测量结果相差较大。

3 数据处理

根据S. K. Rhee的研究^[12],磨痕深度(Δh)服从下式:

$$\Delta h = kp^a v^b t^c \quad (2)$$

式中, p 为对磨面的接触压力,MPa; v 为对磨面的相对运动速度,m·s⁻¹; t 为对磨时间,h; k , a , b 和 c 是磨损经验常数。

通过编写Matlab程序对试验数据进行多元线性回归处理,获得聚氨酯材料的磨损经验常数,代入式(2)得到聚氨酯材料的磨损经验公式:

$$\Delta h = 6.395 \times 10^{-3} p^{1.490} v^{0.602} t^{0.456} \quad (3)$$

由获得的经验公式可以看出,接触载荷对聚氨酯材料的磨损量影响最大,其次为转速,最后为对磨时间。

根据经验公式拟合得到的磨痕深度与试验测量结果的对比如图8所示。

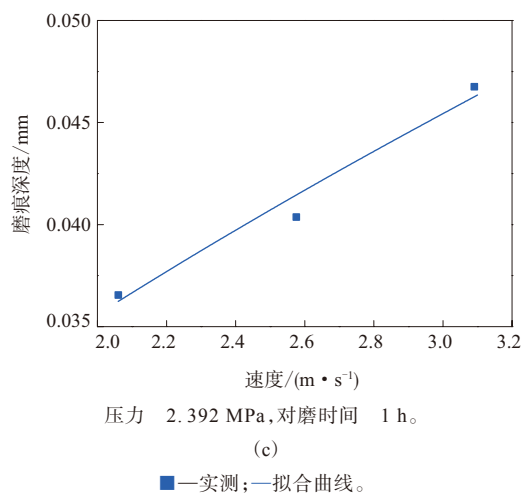
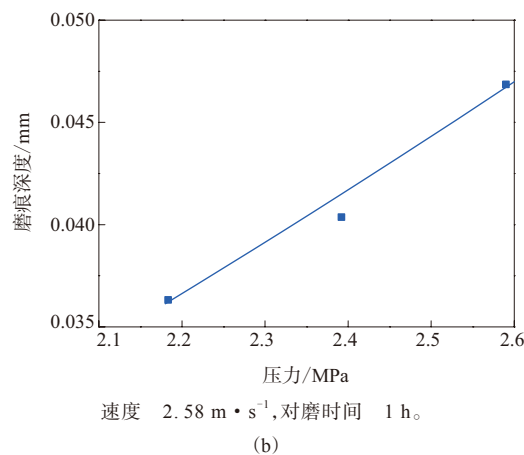
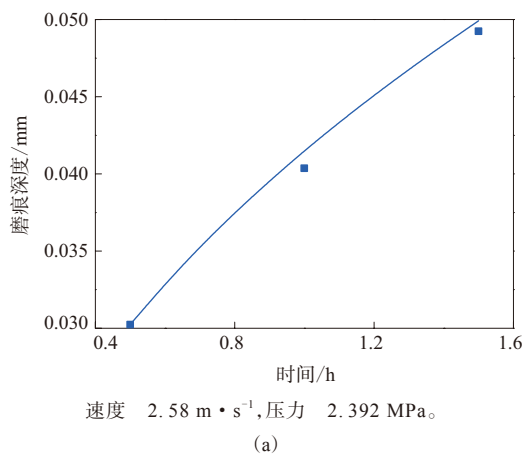


图8 磨痕深度随对磨时间、压力、速度的变化规律

从图8可以看出,式(3)的拟合结果与实测值吻合良好。

4 结论

通过环块磨损试验,定量研究了聚氨酯材料

的磨损规律,为聚氨酯密封件的产品设计和寿命预测提供参考。在研究中通过有限元分析方法计算聚氨酯试样与对磨环的接触压力,改变了以往直接用试验压力除以磨损面积的粗略估算方法;通过表面形貌测量技术获取试样的磨痕深度,克服了滴油润滑试验条件下聚氨酯试样吸油和微量磨损造成称量法无法准确测量的不足。

本方法同样适用于其他橡塑材料或类似材料的磨损规律研究。由于条件所限,未能开展时间较长的磨损试验。对于时间较长的磨损规律研究,在通过有限元方法计算接触压力时需考虑磨损对接触压力的影响。

参考文献:

- [1] 松本富夫,吕貽民. 气动密封件的特性及使用注意事项[J]. 液压与气动,1984,4(3):39-41.
- [2] 王振,姚庆伦,韦永继,等. 密封件用聚氨酯弹性体的研制[J]. 化学推进剂与高分子材料,2009,7(3):43-45.
- [3] 路永明. 聚氨酯橡胶的固定磨粒湿磨损机理的试验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版),1990,14(1):31-35.
- [4] 姚斌,杨兆春. 聚氨酯摩擦磨损规律的研究[J]. 河北科技大学学报,2000,21(1):86-88.
- [5] 张桂兰. 聚氨酯表面改性——大分子结构的控制及其摩擦磨损特性[J]. 世界橡胶工业,2005,32(5):35-39.
- [6] 蔡力锋,王缸荣,林志勇,等. 热塑性聚氨酯/尼龙6复合材料高载磨磨损性能及机理[J]. 高分子材料科学与工程,2011,27(4):92-94.
- [7] Papatheodorou T, Hannifin P. Influence of Hard Chrome Plated Rod Surface Treatments on Sealing Behavior of Hydraulic Rod Seals[J]. Sealing Technology,2005(4):5-10.
- [8] 黄建龙,解广娟,刘正伟. 基于Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业,2008,55(8):467-471.
- [9] 王伟,邓涛,赵树高. 橡胶Mooney-Rivlin模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品,2004,25(4):8-10.
- [10] 郑明军,王文静,陈政南,等. 橡胶Mooney-Rivlin模型力学性能常数的确定[J]. 橡胶工业,2003,50(8):462-465.
- [11] 张延良,周军,邓建新,等. 偶件表面粗糙度对PTFE密封材料摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封,2011,36(6):69-72.
- [12] Rhee S K. Wear Equation for Polymers Sliding Against Metal Surface[J]. Wear,1970,16(6):431.

收稿日期:2016-01-24

Study on Polyurethane Abrasion Based on Finite Element Analysis Method

HUANG Le^{1,2}, JIA Xiaohong², GUO Fei², SUO Shuangfu², ZHOU Chunhua³

(1. Guangzhou Mechanical Engineering Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510700, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Ningbo Zhongyi Hydraulic Motor Co., Ltd, Ningbo 315200, China)

Abstract: In this study, polyurethane wear experiment under dropping lubrication was carried out by block-on-ring wear test. The wear conditions such as different pressure, rotating speed and wear time were investigated and the wear depth was measured by profilometer. The contact force of the grinding surface under different pressures was calculated by finite element analysis software Ansys. The empirical wear formula of polyurethane specimen was obtained through nonlinear regression fitting of test data based on Rhee's wear model, which was in good agreement with the experimental measurement.

Key words: polyurethane; block-on-ring wear; empirical wear formula; finite element analysis

一种制备硫化型吸水膨胀天然橡胶的方法

中图分类号:TQ332.5 文献标志码:D

由海南大学申请的专利(公开号 CN 104693458A, 公开日期 2015-06-10)“一种制备硫化型吸水膨胀天然橡胶的方法”,涉及的硫化型吸水膨胀天然橡胶(NR)是通过由浓缩胶乳、稳定剂、异丙苯过氧化氢(CHP)/四乙烯五胺(TEPA)引发剂体系、丙烯酸钠的单体溶液、丙烯酰胺单体

溶液、交联剂N,N-亚甲基双丙烯酰胺,在30~40℃下接枝共聚制得吸水膨胀NR后,在反应体系中依次加入氢氧化钾溶液、硫黄分散体、促进剂ZDC分散体、氧化锌分散体组成的胶乳硫化体系进行硫化、凝固、干燥制得。该发明省去了繁琐的炼胶过程,制得的硫化型吸水膨胀NR具有吸水性能优异、耐盐性好、吸水后物理性能良好的特点。

(本刊编辑部 赵 敏)